

Capítulo IV

Efeitos de harmônicos no sistema de distribuição e limites segundo as principais normas nacionais e internacionais – Parte III

Igor Amariz Pires*

Capacitores

A maior preocupação a respeito do tema que tem sido abordado nesses fascículos em relação a capacitores é o possível surgimento de ressonâncias com o sistema elétrico. Este efeito causa sobretensões e sobrecorrentes que afetam tanto o sistema elétrico como os capacitores. A reatância de um capacitor diminui com o crescimento da frequência, fazendo o capacitor ser um caminho preferencial de correntes harmônicas. Este fenômeno aumenta o aquecimento e o estresse do seu dielétrico. O resultado do aumento do aquecimento e do estresse no dielétrico é a diminuição da vida útil do capacitor.

Algumas diretrizes para instalações de capacitores podem ser aplicadas em caso de instalações elétricas em baixa tensão:

- Se a potência harmônica das cargas não-lineares, em kVA, for menor que 10% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância;
- Se a potência harmônica das cargas não-lineares, em kVA, for menor que 30% da potência nominal do transformador e a potência reativa dos capacitores for menor que 20% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância.
- Se a potência harmônica das cargas não-lineares for maior que 30% da potência nominal do transformador, devem ser empregados filtros nos capacitores.

Conforme a norma ANSI/IEEE st. 18-2002, os capacitores de potência devem suportar os seguintes valores de sobretensão e sobrecorrente:

- 110% da tensão nominal, e fator de crista menor

que $1,41 \cdot \sqrt{2}$, incluindo harmônicos.

- 180% da corrente nominal, incluindo a fundamental e harmônicos.

Outro dado que apresenta a imunidade de capacitores a tensões harmônicas é dado por:

$$\sum h_n \cdot U_n^2 \leq 44\%$$

Foi descrito, por um grupo de pesquisadores, um caso real de capacitores em um prédio comercial. A quantidade de cargas não-lineares presentes neste ambiente fez um dos bancos que estavam em paralelo a um dos transformadores do sistema elétrico do prédio sofrer uma queima. Por meio de medições, foram constatados sobrecorrentes nos capacitores e transformadores devido aos harmônicos. Os capacitores tinham uma potência de 20% da potência nominal do transformador. A solução proposta foi a instalação de filtros de harmônicos ou sobredimensionamento dos componentes da instalação, visando minimizar o problema de harmônicos.

Relés de proteção

Formas de onda distorcidas afetam o desempenho de relés de proteção, causando uma operação indevida ou mesmo a não operação deles quando necessário. Uma onda senoidal acrescida de harmônicos altera o pico de corrente, diferenciando do que o relé esperaria por presumir que trabalhará com uma onda senoidal. O ângulo das harmônicas em relação à fundamental influencia também no desempenho do relé, que é algo difícil de definir, devido a uma onda distorcida, pois cada relé tem uma resposta diferente a este fenômeno.

Relés de diferentes fabricantes têm respostas diferentes, assim como, em algumas vezes, relés do mesmo fabricante e modelo.

Em um ambiente distorcido, os relés podem falhar quando ocorrer uma falta no sistema elétrico ou, mesmo, podem operar quando não houver nenhuma falta. Relés dependentes de pico de corrente ou passagem por zero não irão operar adequadamente com uma onda distorcida. A presença de 3º harmônico, por corresponder às correntes e tensões de sequência zero, pode causar operação indevida das proteções de terra.

Os relés tendem a operar mais lentamente ou com valores de corrente mais altos na presença de harmônicos. Em geral, o nível de harmônicos requeridos para causar os problemas anteriormente citados está entre 10% a 20% de THD de corrente. Como alternativa aos relés eletromecânicos e eletromagnéticos, que são mais susceptíveis a estes problemas, utilizam-se relés digitais que computem valores RMS em ondas com grande conteúdo harmônico.

Síntese dos efeitos dos harmônicos e grau de imunidade

A Tabela 1 traz uma síntese dos efeitos que os harmônicos causam nos elementos anteriormente citados, bem como o grau de imunidade que cada um tolera. Estes foram baseados nas referências bibliográficas para cada elemento apresentado nas três partes que compõem esse tema.

TABELA 1		
EFEITO DE HARMÔNICOS EM COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO E GRAUS DE IMUNIDADE		
Equipamento	Efeitos devido à presença de harmônicos	Grau de imunidade
Máquinas rotativas	Torque pulsante	$\sqrt{\sum(U_h/I_h)^2} \leq 1,3$ a 2,4% (máquinas síncronas)
	Ruído audível	
	Sobreaquecimento	$\sqrt{\sum(U_h/I_h)^2} \leq 1,5$ a 3,5% (máquinas assíncronas)
	Perda de vida útil no isolamento	
Condutores	Sobreaquecimento	$\sqrt{\sum U_h^2} \leq 10\%$
	Diminuição na capacidade de condução de corrente	
Medidores de energia	Erro na tarifação	$THD_v \leq 20\%$
Relés de proteção	Operação indevida	$THD_i \leq 10\%$
	Inoperância	
Capacitores	Ressonância	$\sum h.U_h^2 \leq 44\%$ $V_h \leq 115\%$ $V_h \leq 180\%$
	Perda de vida útil do dielétrico	
Transformadores	Aumento nas perdas nos enrolamentos, ferro e componentes	$\sqrt{\sum U_h^2} \leq 5\%$ carga plena $\leq 10\%$ a vazio
	Sobreaquecimento	
Equipamentos eletrônicos	Maior susceptibilidade a sags	$\sqrt{\sum U_h^2} \leq 5\%$ (para computadores)
	Perda de sincronismo em contadores digitais	
	Imagens distorcidas nos tubos catódicos	
Iluminação	Diminuição da vida útil em lâmpadas incandescentes	Flicker
	Ruídos audíveis em lâmpadas fluorescentes	
Sistemas de telefonia	Ruídos audíveis	$IT \leq 10000$

TABELA 2
LIMITES GLOBAIS DE HARMÔNICOS EXPRESSOS EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor por harm. (%)	Ordem	Valor por harm. (%)	Ordem	Valor por harm. (%)	Ordem	Valor por harm. (%)
3, 5, 7	5	2, 4, 6	2	3, 5, 7	2	2, 4, 6	1
9, 11, 13				9, 11, 13	1,5		
15 a 25		≥ 8	1	15 a 25	1	≥ 8	0,5
≥ 27				≥ 27	0,5		
THD _V = 6%				THD _V = 3%			

Limites de harmônicos segundo normas nacionais e internacionais

Segundo padrões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), os limites de harmônicos para faixas acima e abaixo de 69 kV são descritos na Tabela 2. O THD_V para tensões abaixo de 69 kV é limitado em 6% enquanto para tensões acima de 69 kV está em 3%.

Os valores recomendados segundo a norma IEEE std. 519/1992 são apresentados na Tabela 3.

Faixa de tensão	Distorção individual por harmônico (%)	Distorção total de tensão – THDV (%)
V ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < V < 161 kV	1,5	2,0
V ≥ 161 kV	1,0	1,5

Nas Tabelas 2 e 3, os limites estabelecidos são bem próximos, sendo a tabela do ONS mais detalhada em relação aos limites estabelecidos para cada harmônico.

Alguns pesquisadores transcreveram os limites das tensões harmônicas sugeridas pela norma IEC 61000-2-2 para sistemas públicos de baixa tensão (240 V e 415 V). A Tabela 4 apresenta estes limites.

Ordem ímpar	Tensão harmônica (%)*	Ordem ímpar – múltiplo de 3	Tensão harmônica (%)*	Ordem par	Tensão harmônica (%)*
5	6,0	3	5,0	2	2
7	5,0	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	> 21	0,2	10	0,2
19	1,5			> 12	0,2
23	1,5				
25	1,5				
> 25	0,2 + 1,3 x 25/h				
THDV (até o 40º harmônico) < 8%					

* Valores em relação à tensão fundamental

Na Tabela 4, percebe-se que a norma IEC é menos rígida para sistemas de baixa tensão (THD_V = 8%). A norma IEEE std. 519/1992 define limites de distorção de corrente em um ponto do sistema elétrico conforme sua corrente de curto-circuito e níveis de tensão.

Já as Tabelas 5, 6 e 7 trazem estas recomendações, diferenciadas pelo nível de tensão. Há um termo utilizado nesta norma que é o TDD (Total Demand Distortion). Tendo a mesma formulação

matemática que o THD, diferenciando no termo do dividendo que, enquanto no THD será a fundamental da tensão ou corrente do sinal analisado, o TDD usará a tensão ou corrente de demanda nominal no barramento analisado. Em outras palavras, o TDD seria o THD na situação em que a fundamental da tensão ou corrente estivessem em seus valores nominais de demanda.

TABELA 5
LIMITES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO (V ≤ 69 kV)

Distorção de corrente em percentuais de I _{carga}						
Harmônicos individuais						
I _{CC} /I _{carga}	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	H ≤ 35	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares
I_{CC} = corrente máxima de curto-circuito
I_{carga} = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)

TABELA 6
LIMITES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE PARA SISTEMAS DE SUBTRANSMISSÃO (69 kV < V ≤ 161 kV)

Distorção de corrente em percentuais de I _{carga}						
Harmônicos individuais						
I _{CC} /I _{carga}	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
< 20	2,0	1,0	1,75	0,3	0,2	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,5	10,0

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares
I_{CC} = corrente máxima de curto-circuito
I_{carga} = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)

TABELA 7
LIMITES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO (V > 161 kV)

Distorção de corrente em percentuais de I _{carga}						
Harmônicos individuais						
I _{CC} /I _{carga}	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	h ≥ 35	TDD
< 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares
I_{CC} = corrente máxima de curto-circuito
I_{carga} = demanda máxima de corrente de carga (somente fundamental)

A IEC 61000-3-2 define limites de correntes harmônicas que podem ser emitidos por aparelhos que trabalham com uma corrente

eficaz menor que 16 A por fase. Os aparelhos são divididos em quatro classes:

- Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada e todos os demais que não se enquadram nas outras classes.
- Classe B: Equipamentos portáteis.
- Classe C: Equipamentos para iluminação incluindo dispositivos dimmer.
- Classe D: Equipamentos contendo uma forma de onda de corrente de entrada “especial” com uma potência ativa de entrada menor que 600 W.

Os limites para os equipamentos classe A estão expostos na Tabela 8. Para os equipamentos de classe B, basta utilizar os índices da Tabela 8 e multiplicá-los por 1,5. A Tabela 9 apresenta os limites para equipamentos classe C enquanto a Tabela 10 mostra os limites para os equipamentos classe D.

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (A)	C	Máxima corrente (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	01/08/40	0,23 x 8/h
11	0,33		
13	0,21		
15-39	0,15 x 15/h		

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (%)*
2	2
3	30% x fator de potência
5	10
7	7
9	5
01/11/39	3

* Em relação à corrente fundamental

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (%)*	
	Por watt (mA/W)	(A)
2	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,50	0,40
11	0,35	0,33
13	0,3	0,21
15-39	3,86/h	2,25/h

Para equipamentos com correntes acima de 16 A e abaixo de 75 A por fase, a norma IEC 61000-3-4 fixa os limites de correntes harmônicas para estes equipamentos. Os limites estão na Tabela 11.

Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (%)*	Ordem harmônica (h)	Máxima corrente (A)
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

* Em relação à corrente fundamental

Conclusões gerais

Nestes três últimos capítulos (do II ao IV), procurou-se mostrar os principais efeitos que os harmônicos causam nos seguintes componentes do sistema elétrico: medidores de energia, condutores, iluminação, máquinas rotativas, equipamentos eletrônicos, interferência telefônica, transformadores, capacitores, relés de proteção. Além destes efeitos, foram mostrados os limites de harmônicos segundo as principais normas nacionais e internacionais.

Os harmônicos causam perdas para o consumidor e para a concessionária de energia. Apesar destas perdas, os equipamentos mencionados têm um nível de susceptibilidade a harmônicos. Nos limites relacionados pelas normas, a norma brasileira estabelece 6% de THD de tensão para o sistema de baixa tensão. Já o IEEE limita em 5% enquanto a IEC admite 8% de THD de tensão.

Para correntes harmônicas, o IEEE apresenta limites da distorção que a corrente poderá ter de acordo com a relação (divisão) corrente de curto-circuito e corrente nominal. Quanto mais alta esta relação, o limite de distorção de corrente também será mais alto, tendo um limite de 20% de distorção de corrente nominal (TDD de 20%).

A IEC tem várias normas que limitam a produção de harmônicos por parte de equipamentos eletrônicos, dependendo de sua finalidade e potência. Os efeitos de harmônicos no sistema de distribuição, em conjunto com os limites determinados por normas nacionais e internacionais, mostram que se pode conviver com harmônicos, desde que eles estejam devidamente controlados.

Referências

(Para os capítulos II, III e IV)

IEEE std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.

OLIVEIRA, M. et al. Efeito das distorções harmônicas nas medições de energia elétrica. III SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, ST 1 – IT 7, 8-12 de agosto de 1999, Brasília – DF.

GALHARDO, M. A. B.; PINHO, J. T. Conceitos de distorção e não-linearidades. V SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, 17-20 de agosto de 2003, Aracaju – SE.

VASCONCELOS, F. H. et al. Calibração de medidores de energia elétrica

ativa em condições não senoidais. *Metrologia* 2003, Sociedade Brasileira de Metrologia, 01 a 05 de setembro de 2003, Recife – PE.

SILVA, R.V. R. et al. Análise de desempenho de medidores de watt-hora sob condições não senoidais. III SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, ST 8 – IT 61, 8-12 de agosto de 1999, Brasília – DF.

IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment, *Effects of Harmonics on Equipment*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 2, April 1993.

HIRANANDAM, A. Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics. *IEEE Industry Applications Magazine*, March/April 1998, p. 42-51.

DIAS, G. A. D. Harmônicas em sistemas industriais. 2. edição, Edipucrs, 1998.

CHEN, M. T.; FU, C. H. Characteristics of Fluorescent Lamps under abnormal System Voltage Conditions. *Electric Power System Research*, n. 41, 1997.

KLINGSHIRN, E. A.; JORDAN, H. E. Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-87, n. 3, March 1968.

LEE, C. Y. et al. The Effect of Harmonic Phase Angle on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor, *IEEE* 2000.

EMANUEL, A. E. Estimating the Effects of Harmonic Voltage Fluctuations on the Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 6, n. 1, March 1991.

ORAE, H. A Quantative Approach to Estimate the Life Expectancy of Motor Insulation Systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 7, n. 16, December 2000.

BARROS, J. DIEGO, R. I. Effects of Nonsinusoidal Supply on Voltage Tolerance of Equipment. *IEEE Power Engineering Review*, July 2002.

DELAIBA A. C. et al. The Effect of Harmonics on Power Transformers Loss of Life.

38th Midwest Symposium on Circuits and System. Rio de Janeiro, 1995, v. 1, p. 933-936.

IEEE std C57.12.00-2000 IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.

CAVALLINI A. et al. A Parametric Investigation on the Effect of Harmonic Distortion on Life Expectancy of Power Capacitors. 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, 1996, Italy, v. 1 p. 491-494.

DUARTE, L. H. S.; ALVES, M. F. Degradação dos capacitores de potência sob influência dos componentes harmônicos. XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 21 a 26 de outubro de 2001, Campinas – SP.

IEEE std. 18-2002, IEEE Standard for Shunt Power Capacitors.

SIQUEIRA, F. J. B.; SILVA, E. P. de. Harmônicos e capacitores em prédios comerciais: análise de um caso real, *Eletricidade Moderna*, fevereiro de 1998.

BROZEK, J. P. The Effects of Harmonics on Overcurrent Protection Devices. *IEEE Conference Record of the Industry Applications Society Annual Meeting*, 1990.

ONS, Submódulo 2.2.2 – Padrões para Desempenho da Rede Básica, 2002.

DUGAN, R.C. et al. *Electrical Power Systems Quality*, second edition, McGraw-Hill.

***IGOR AMARIZ PIRES é engenheiro eletricista, mestre e doutorando em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com ênfase em qualidade da energia elétrica.**

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o

e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br